

Игнатова А.В., Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Шаблей А.А. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 121–137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09

Ignatova A.V., Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Shabley A.A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 121-137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.4.09

УДК 539.3 + 531.43 + 004.942

## ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА АРАМИДНОЙ ТКАНИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИКУ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИТЕЙ

**А.В. Игнатова, Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Шаблей**

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 30 августа 2017 г.  
Принята: 10 декабря 2017 г.  
Опубликована: 29 декабря 2017 г.

#### Ключевые слова:

aramидная ткань, вытягивание нити из ткани, поверхностная обработка, механические свойства, предел прочности, коэффициент трения, эксперимент, конечно-элементный анализ, LS-DYNA, суперкомпьютерное моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Арамидные ткани широко применяются в защитных бронеструктурах (бронежилеты, каски и др.). Наиболее важной задачей при разработке таких структур является уменьшение доли кинетической энергии пули, передаваемой объекту, расположенному за бронепанелью, и выражающейся в снижении величины динамического прогиба тыльной стороны бронепанели. Литературные источники связывают значительную часть энергии, поглощаемой бронепанелью, с работой сил трения вытягиваемых нитей. В данной работе представлен технологичный способ управления процессом сухого трения между нитями – поверхностная обработка различными составами (суспензия ПВА, канифоль, силиконовая смазка) с незначительным утяжелением ткани.

В экспериментальной части статьи представлены результаты квазистатических испытаний на вытягивание нити из арамидной ткани плотного переплетения P110 с разными типами поверхностной обработки, получены зависимости «нагрузка – перемещение». Для примера поверхностная обработка тканей ПВА с утяжелением до 6% позволяет увеличить фрикционное взаимодействие между нитями в четыре раза. Упругие и прочностные характеристики арамидных нитей были определены при квазистатическом нагружении. Коэффициент трения между нитями в сухой ткани был определен экспериментально.

В расчетной части статьи была разработана малопараметрическая численная модель вытягивания нити из ткани P110 в пакете программ LS-DYNA, реализующем метод конечных элементов в явной постановке. Показано, что поверхностную обработку ткани (и повышение/понижение усилий вытягивания) в численной модели можно адекватно описать изменением коэффициента сухого трения. Были получены расчетные зависимости нагрузки от перемещения при вытягивании нити из ткани с поверхностными обработками и без нее, которые лежат в соответствующих полосах разброса экспериментальных данных.

© ПНИПУ

© Игнатова Анастасия Валерьевна – инженер, e-mail: [ignatovaav@susu.ru](mailto:ignatovaav@susu.ru)  
Долганина Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: [dolganinani@susu.ru](mailto:dolganinani@susu.ru)  
Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, 76, e-mail: [ssb@susu.ru](mailto:ssb@susu.ru)  
Шаблей Александра Андреевна – программист, e-mail: [shableiaa@susu.ru](mailto:shableiaa@susu.ru)

Anastasia V. Ignatova – Engineer, e-mail: [ignatovaav@susu.ru](mailto:ignatovaav@susu.ru)  
Natalya Y. Dolganina – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [dolganinani@susu.ru](mailto:dolganinani@susu.ru)  
Sergei B. Sapozhnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [ssb@susu.ac.ru](mailto:ssb@susu.ac.ru)  
Alexandra A. Shabley – Programmer, e-mail: [shableiaa@susu.ru](mailto:shableiaa@susu.ru)



## ARAMID FABRIC SURFACE TREATMENT AND ITS IMPACT ON THE MECHANICS OF YARN'S FRICTIONAL INTERACTION

A.V. Ignatova, N.Yu. Dolganina, S.B. Sapozhnikov, A.A. Shabley

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 30 August 2017  
Accepted: 10 December 2017  
Published: 29 December 2017

#### Keywords:

aramid fabric, pull-out test, surface treatment, mechanical properties, ultimate tensile strength, frictional coefficient, experiment, FEA, LS-DYNA, supercomputer modelling.

### ABSTRACT

Aramid textiles are widely used in protective armor structures (vests, helmets, etc.). The most important problem of the development of such structures is to reduce the fraction of the bullet's kinetic energy transmitted to the object located behind the armor panel. The reduction of the kinetic energy results to decrease a dynamic deflection of the back surface of the armor panel. Researches show that a significant part of the energy absorbed by the armor panel is linked to frictional forces of pulled yarns. In this paper, we present an effective method for controlling of dry friction between yarns – surface treatment by PVA suspension, rosin or silicone grease with a slight overweighting of the fabric.

In the experimental part of the paper, the results of quasi-static yarn pull-out tests from an aramid fabric SVM P110 with a plane structure (with different types of surface treatment) are presented. The relationships between force and displacement are also obtained. It can be noticed that the surface treatment of fabrics with addition of only 6 wt. % leads to increase frictional interaction between the yarns by 4 times. Elastic and strength properties of aramid yarns are obtained from quasi-static tensile tests. The dry friction coefficient between yarn and neat fabric is determined by experiments.

The numerical part of the paper is devoted to development of low-parametric FE model of a yarn pull-out test for P110 fabric performed in explicit FE code LS-DYNA. It is shown that different surface treatment can be effectively substitute during calculations by variation of dry friction coefficient (and increase/decrease yarn pull-out force). The calculated "force –displacement" curves are obtained by pulling out a yarn from a fabric with and without surface treatments, which imposed within the corresponding scatter band of the experimental data.

© PNRPU

---

## Введение

Баллистические ткани на основе волокон СВМ, Kevlar™, Twaron™, Dyneema™, Spectra™ и других широко применяются в качестве элементов защитных структур [1–3]. Преимущества данных тканей в том, что они состоят из арамидных нитей или нитей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, которые обладают наибольшими значениями удельного модуля упругости или удельной прочности среди известных конструкционных материалов. Такие материалы эффективно распределяют кинетическую энергию пули за счет высокой скорости звука в нитях, однако при постепенном торможении пули динамические процессы в нитях затухают и наступает стадия сравнительно медленного фрикционного взаимодействия нитей внутри каждого слоя ткани. Таким образом, при проектировании высокоэффективных структур для защиты тела человека (бронежилетов, щитов, касок) важно учитывать не только динамическую, но и фрикционную фазу работы слоев тканей, что обеспечит снижение прогиба тыльной стороны защитной структуры и соответствующее снижение травмирования человека [2–8]. В наружных слоях бронежилета, контактирующих с высокоскоростной пулей, превалирует динамическая фаза работы тканей, а в тыльных слоях – фрикционная, низкоскоростная. Такое деление бронеструктуры заставляет по-разному относиться к взаимодействию нитей в тканевых слоях: снижать трение в наружных и повышать трение между нитями в тыльных слоях или применять ткани с различными типами переплетения (сатин, саржа, полотно) по толщине бронеструктуры [9].

Следует заметить, что экономические аспекты производства бронеструктур диктовали свои правила и заставляли производителей выбирать лишь один тип тканей (в США это было полотняное из некрученых нитей, а в СССР – саржевое переплетение нитей со слабой круткой). В начале XXI века появились гибридные структуры, в которых в тыльной части между тканями из арамидных волокон использовали дополнительные тканевые слои из полиамидных волокон, снижающие скорость звука и удлиняющие динамическую фазу работы пакета тыльных слоев [10, 11]. Известны также конструктивные способы усиления фрикционного взаимодействия нитей в слоях за счет плотной прострочки пакета из нескольких тыльных слоев [1, 12–15]. К отмеченным способам следует добавить покрытие тканей слоем полимера [16, 17], использование неньютоновских жидкостей [14, 15, 18–22], композиций с абразивными частицами [12, 23–26] и др. Очевидно, что любая сквозная пропитка полимером значительно увеличивает поверхностную плотность ткани и делает невозможным вытягивание нитей, что приводит к их обрыву при локальном ударе.

Важно отметить, что для изучения механизма вытягивания нитей из ткани используют как численные подходы, так и экспериментальные исследования [6, 17, 27–31]. В экспериментальных работах определяется, как правило, максимальное усилие и энергия, затраченная на вытягивание, а также коэффициент трения в тканях с конкретной структурой переплетения, шириной и круткой нитей, шагом и плотностью набивки, линейной плотностью нитей основы и утка. Однако экспериментальный подход не позволяет выявить влияние отдельных факторов на кинетику процесса вытягивания нитей. Существует несколько численных подходов (метод конечных элементов), которые учитывают влияние ряда факторов на процесс вытягивания одиночной нити. Ткани моделируют сплошной средой [30, 32], а отдельные нити – балочными [8, 33], оболочечными [21, 31, 34] и объемными [6, 28, 29, 35] конечными элементами. Модели сплошной среды не позволяют исследовать вытягивание нити из ткани. В моделях с балочными конечными элементами невозможно учесть контактное взаимодействие между нитями, их большие перемещения. Для моделей тканей с объемными анизотропными конечными элементами нитей требуются большие вычислительные ресурсы. Отмеченные сложности моделирования (большие перемещения, анизотропия, односторонние фрикционные связи) не позволили получить удовлетворительное количественное согласие с экспериментом для всей диаграммы вытягивания, включая начальный этап и амплитуду осцилляций усилия вытяжки [6, 21, 28–31].

На наш взгляд, большими перспективами обладают модели с оболочечными конечными элементами [36, 37], которые позволяют учесть множественные контактные взаимодействия, анизотропию нитей и требуют на порядок меньших вычислительных ресурсов по сравнению с объемными, важно лишь корректно ввести геометрию переплетения и предложить способ замены пучка волокон оболочкой постоянной толщины.

В данной работе представлены способы модификации арамидной ткани P110 за счет поверхностной обработки, которые приводят к увеличению фрикционного взаимодействия нитей при минимальном утяжелении ткани. Проведены эксперименты по вытягиванию нити из тканей. Экспериментально определены механические свойства нитей и коэффициент трения между нитями для арамидной ткани P110. Разработана эффективная численная модель ткани полотняного переплетения с использованием оболочечных конечных элементов с разными видами поверхностных обработок, меняющих коэффициент трения. Данная модель позволяет рассчитывать диаграммы «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити с осциллирующим затуханием нагрузки. Полученные расчетные зависимости лежат в диапазоне разброса экспериментальных данных.

## 1. Изготовление образцов

В работе рассмотрена арамидная ткань полотняного переплетения типа P110 (с поверхностной плотностью 110 г/кв. м) (рис. 1). Образцы тканей для исследований усилий вытягивания имели размеры 50×50 мм. Для ткани P110 выполнено несколько видов поверхностной обработки, которые позволяют управлять силами трения (увеличивать или уменьшать):

1. исходная ткань без поверхностной обработки;
2. водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 38 %, утяжеление ткани 5,1 %;
3. ПВА-Т – водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 38 %, утяжеление ткани 5,1 %. Ткань дополнительно подвергали температурной обработке +98 °С;
4. канифоль сосновая В10 (производство ООО «Паяльные материалы», г. Рязань), утяжеление ткани 3,1 %;
5. силиконовая смазка FELIX (производитель ООО «Тосол-Синтез-Инвест», г. Дзержинск), утяжеление ткани ~19,4 %.

Водную эмульсию ПВА наносили на ткань и разравнивали плоским шпателем так, чтобы материал оставался лишь в местах переплетения (минимально возможное количество), после чего выдерживали в сушильном шкафу 24 ч при температуре +40 °С до полного высыхания водной основы. Канифоль в измельченном порошкообразном виде наносили на поверхность ткани, далее опрыскивали этиловым спиртом для растворения канифоли и выдерживали при температуре +60 °С в течение 24 ч. Силиконовую смазку наносили на поверхность ткани разбрызгиванием (штатная спрей-упаковка), видимые капли излишков удаляли с помощью салфетки.

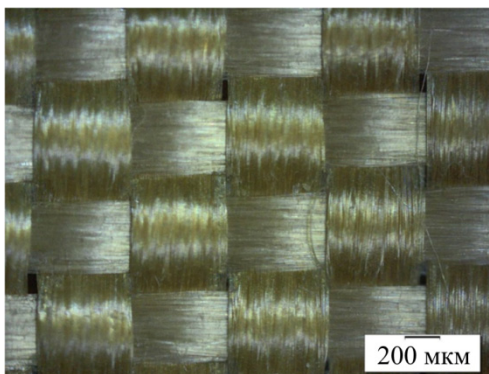


Рис. 1. Фотография баллистической ткани полотняного переплетения (нити основы расположены по горизонтали)

Fig. 1. Image of plane weave ballistic fabric (warp is horizontal)

## 2. Экспериментальная часть

Проведены квазистатические испытания на вытягивание нити из ткани с поверхностной обработкой и без нее, на растяжение отдельных нитей и определение коэффициента сухого трения между нитью и тканью. Все испытания были проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882 с тисочными захватами INSTRON 2710-106 и датчиком силы с максимальной нагрузкой 100 Н.

## 2.1. Квазистатическое растяжение нити

Механические свойства нитей были определены при квазистатическом растяжении. Нити основы отделили от ткани P110. Полная длина нитей 200 мм, длина рабочей части – 100 мм, захватных частей – 50 мм. Области нити для зажима были предварительно обработаны цианакрилатным клеем (Axton) и высушены при комнатной температуре в течение 2 часов. Образцы растягивали со скоростью 5 мм/мин. В результате были получены диаграммы деформирования при растяжении и разгрузке при максимальных нагрузках, соответствующих ~50 % от нагрузки разрушения (наблюдаемый разброс диаграмм отмечен заливкой серым). Участки с переменной жесткостью, связанной с распрямлением регулярно искривленных нитей, выделенных из ткани, использовали ниже (п. 3) для оценки трансверсального модуля сдвига (рис. 2, 3). Нагрузка разрушения при растяжении нити лежит в диапазоне 54–68 Н (среднее значение 61Н). Среднее значение предела прочности нити ~3,0 ГПа, модуля упругости ~140 ГПа.

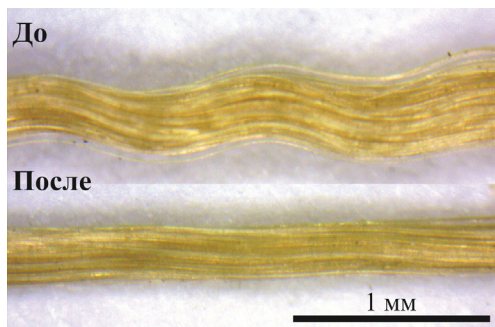


Рис. 2. Фотография арамидной нити до и после испытания

Fig. 2. Image of aramid yarn before and after the tension test

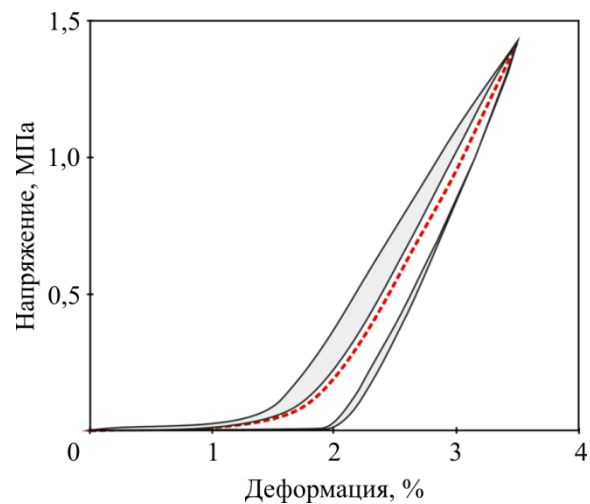


Рис. 3. Диаграммы «напряжение–деформация» арамидной нити  
Fig. 3. Engineering diagrams "stress – strain" of the aramid yarn

## 2.2. Вытягивание нитей

При локальном ударе в бронезилет задействуются нити в тканях, которые лежат непосредственно под индентором. Количество задействованных нитей зависит от размера ударника. В работе [38] было показано, как усилие зависит от количества нитей, важно лишь знать кривую вытягивания одиночной нити. Поэтому в данной работе были проведены эксперименты лишь на вытягивание одиночной нити с поверхностными обработками и без нее.

Вытягивание нити из ткани проводили со скоростью 50 мм/мин при комнатной температуре. Вытягиваемую нить закрепляли в захвате, поверхности которого покрыты тонким слоем эластомера, что обеспечивало эффективную передачу нагрузки на нити без их травмирования. На тисочные захваты были приклеены 2 полосы ленты из пластика толщиной 0,5 мм и шириной 15 мм на расстоянии 10 мм друг от друга, обеспечивающие защемление краев тканевого образца. Свободная зона, из которой происходило вытягивание нити, имела ширину 10 мм (рис. 4).

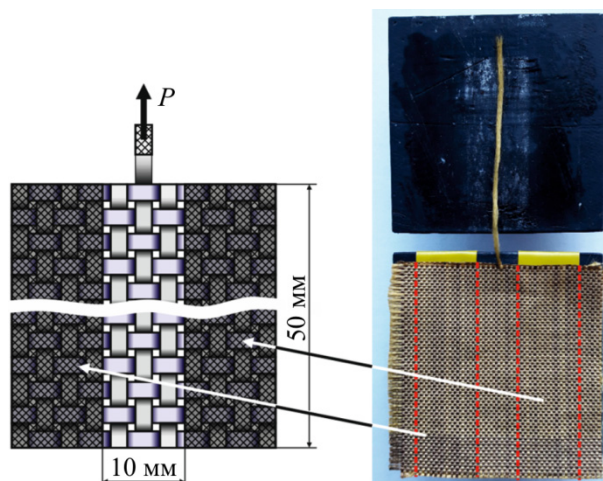


Рис. 4. Схема и фотография закрепления образца при вытягивании нити:  $P$  – нагрузка, штриховка – заделка  
 Fig. 4. Scheme and photo of fixing the specimen under pull-out test:  $P$  – force, hatching – fixed

Полученные результаты испытаний «нагрузка–перемещение» для исходных и обработанных тканей представлены на рис. 5–7.

Полученные кривые «нагрузка–перемещение» имеют два участка: 1) возрастания нагрузки до перемещения 2–2,5 мм и 2) снижения до нуля при полной вытяжке нити из ткани. На первом участке нить выпрямляется, при этом свободный конец нити еще неподвижен, на втором – нить начинает двигаться.

В табл. 1 представлены значения поверхностной плотности  $\rho$  ткани, максимального усилия  $F_{max}$ , энергии  $W$  и удельной энергии  $W/\rho$ , затраченных на вытягивание нити из ткани с различными типами обработки. Энергия  $W$ , затраченная на вытягивание, – это площадь под кривой «нагрузка–перемещение».

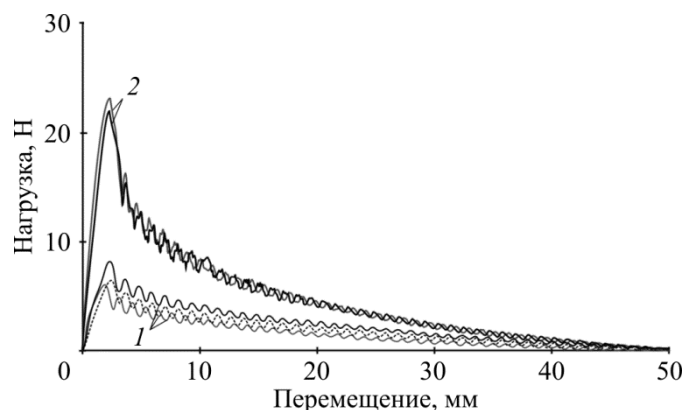


Рис. 5. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани P110:  
 1 – ткань без обработки; 2 – ткань с поверхностной обработкой ПВА  
 Fig. 5. Diagrams “force – displacement” of pull-out test:  
 1 – neat fabric; 2 – fabric with surface treatment by PVA

Поверхностная обработка существенно повышает максимальное усилие вытягивания, увеличивая трение между нитями и повышая рассеяние энергии. Анализ результатов вытягивания нитей показал, что композиции на основе канифоли, ПВА с температурной обработкой и без нее имеют практически одинаковые значения максимального усилия, кривые «нагрузка–перемещение» при вытягивании нити из ткани лежат близко друг к другу.

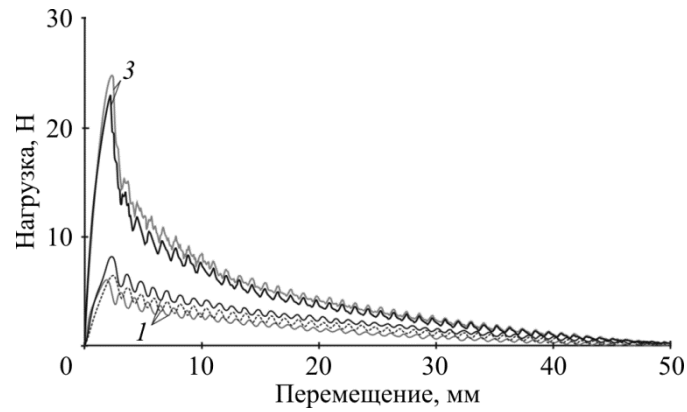


Рис. 6. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани P110:  
 1 – ткань без обработки; 3 – ткань с поверхностной обработкой ПВА-Т  
 Fig. 6. Diagrams “force – displacement” of pull-out test: 1 – neat fabric;  
 3 – fabric with surface treatment by PVA-T suspension

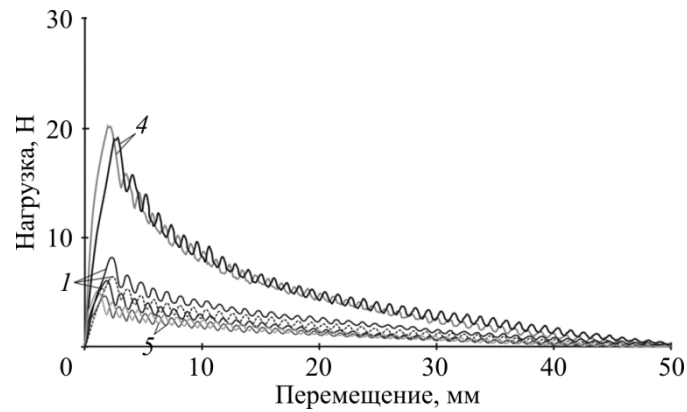


Рис. 7. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани P110:  
 1 – ткань без обработки; 4 – ткань с поверхностной обработкой канифолью;  
 5 – ткань с поверхностной обработкой силиконовой смазкой  
 Fig. 7. Diagrams “force – displacement” of pull-out test: 1 – neat fabric;  
 4, 5 – fabric with surface treatment by rosin and silicone grease

Таблица 1

Характеристики вытягивания нити из ткани (исходной и с поверхностной обработкой)

Table 1

Characteristics of pull-out test (neat fabric and fabric with surface treatment)

№ п/п	Тип пропитки	Поверх. плотность с учетом пропитки $\rho$ , кг/м <sup>2</sup>	Увеличение массы, %	Макс. усилие, $F_{max}$ , Н	Энергия $W$ , Дж	Удельная энергия, $W/\rho$
1	–	110	–	6,49	0,088	8,00E-04
				8,23	0,114	10,4 E-04
				6,05	0,074	6,73 E-04
2	ПВА	115,6	5,1	21,99	0,228	19,7 E-04
				23,22	0,234	20,2 E-04
3	ПВА-Т	115,6	5,1	24,90	0,229	19,8 E-04
				22,97	0,204	17,7E-04
4	Канифоль	113,4	3,1	20,17	0,239	21,1 E-04
				19,07	0,244	21,5 E-04
5	Силиконовая смазка	131,3	19,4	4,65	0,056	4,3 E-04
				5,12	0,060	4,6 E-04

Обработка канифолью имеет преимущества за счет того, что из твердого состояния при скольжении нити она переходит в жидкое, так как легко плавится при трении. После остановки нити канифоль остывает и вновь становится твердым телом, не изменяя своих свойств при повторном вытягивании. Полагаем, что этот факт может быть полезен при создании бронежилетов для защиты от многократных ударов. Обработка ткани силиконовой смазкой привела к уменьшению максимального усилия при вытяжке нити и снижению энергии, затраченной на трение.

### 2.3. Определение трения между нитями

Определение коэффициента трения нити по ткани было выполнено способом Эйлера [39, 40]: на пластиковый цилиндр была приклеена ткань полотняного переплетения P110 без поверхностной обработки с помощью двухстороннего скотча. Один конец свободной

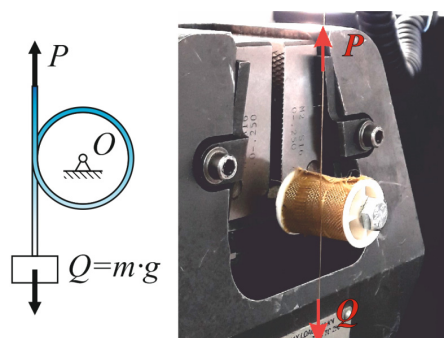


Рис. 8. Схема и фотография закрепления образца при определении коэффициента трения  
Fig. 8. Scheme and photo of testing the coefficient of friction

нити был закреплен в захвате, далее нить обернули вокруг цилиндра на один оборот ( $360^\circ$ ), к другому концу нити прикрепили груз массой 100 г (рис. 8). Нить нагружали со скоростью 50 мм/мин при комнатной температуре. В результате испытаний были получены кривые «нагрузка–перемещение», на которых имеется зона трения покоя (с большей нагрузкой) и зона трения скольжения (с практически постоянным усилием) (рис. 9).

Периодическое изменение нагрузки обусловлено автоколебательной природой трения упругой нити по цилиндру. По формуле Эйлера определили коэффициент трения

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{P}{Q} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол охвата нитью цилиндра,  $\alpha = 2\pi$ ;  $P$  и  $Q$  – нагрузка, прикладываемая к концам нити сверху и снизу относительно цилиндра;  $P = 3,01$  Н и  $Q = 0,98$  Н. По формуле (1) получили коэффициент трения  $\mu = 0,174$ .

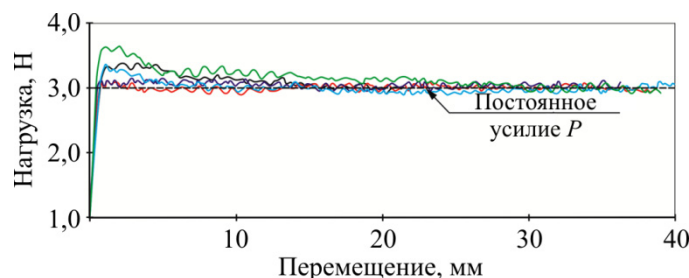


Рис. 9. Кривые «нагрузка–перемещение» при определении коэффициента трения

Fig. 9. Diagrams “force–displacement” of coefficient of the friction test



### 3. Численное моделирование

Геометрия переплетения нитей в ткани является достаточно сложной, оси нитей регулярно искривлены, нити составлены из сотен волокон, и этот пучок имеет крутку около 100 об/м. В литературе имеется несколько подходов по замене нитей в расчетах более простыми объектами: балочными, объемами, оболочками переменной толщины [6, 8, 21, 28, 34, 42]. В данной работе в рамках пакета LS-DYNA предлагается упрощение геометрии нити в виде кусочно-линейного набора плоских элементов (SHELL) с постоянной шириной и толщиной (рис. 10). Этим обеспечивается минимум геометрических параметров и численная эффективность (минимум времени расчетов на ЭВМ).

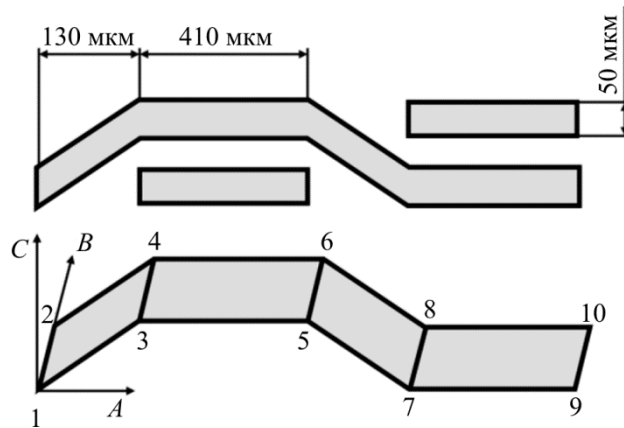


Рис. 10. Повторяющийся элемент геометрии нити  
Fig. 10. Repeating yarn geometry element

Материал этих элементов принимается упругим и ортотропным (9 констант упругости). Испытания на растяжение с разгрузкой нитей, выделенных из ткани, проведены выше (п. 2.1).

Моделирование растяжения одной изолированной искривленной нити показало, что диаграмма деформирования может быть описана лишь двумя константами:  $E_A$  – модулем упругости первого рода (модулем упругости вдоль оси нити) и  $G_{CA}$  – модулем упругости второго рода (трансверсальным модулем сдвига). Остальные упругие константы слабо влияют на жесткость модели нити при ее разгибе. Красной пунктирной линией показан результат расчета диаграммы растяжения (распрямления) нити при  $E_A = 140$  ГПа и  $G_{CA} = 40$  МПа. Так как предложенная модель не имеет внутреннего трения, диаграммы растяжения и разгрузки совпадают.

Для решения задачи по вытягиванию нити из ткани полотняного переплетения P110 была создана конечно-элементная модель ткани размером  $50 \times 10$  мм, состоящая из отдельных изогнутых нитей (рис. 11). В расчетной модели нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Повторяющийся элемент геометрии (см. рис. 10) имеет ключевые точки, координаты которых были введены в пакет программ ANSYS, после чего по ключевым точкам были построены соответствующие поверхности 1-2-4-3, 3-4-6-5 и т.д. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели, и построена сетка конечных элементов с одним оболочечным элементом по ширине каждой нити. Края ткани были закреплены (заделка) по схеме (см. рис. 4).

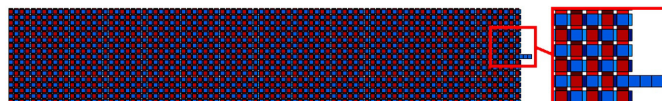


Рис. 11. Сетка конечных элементов  
Fig. 11. Finite element mesh of model

Из списка материалов, доступных в пакете программ LS-DYNA [41], для нитей был выбран ортотропный материал (\*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE), который для оболочечных конечных элементов позволяет учитывать анизотропию и развитие микрповреждений за счет коррекции характеристик упругости. Эта опция в данной работе не используется ввиду сохранения целостности нитей, но за счет дополнительного численного демпфирования решение задачи более устойчиво. Характеристики материала приведены в табл. 2. Значения модулей упругости первого рода  $E_B$ ,  $E_C$ , а также модулей упругости второго рода –  $G_{AB}$ ,  $G_{BC}$  были приняты на порядок меньше модуля упругости  $E_A$ , а коэффициенты Пуассона были выбраны близкими к нулю [21, 42, 43, 44], поскольку они слабо влияют на жесткость модели при одноосном нагружении. Модели с оболочечными конечными элементами должны иметь минимум три точки интегрирования по толщине для учета жесткости при поперечном изгибе.

Таблица 2

Характеристики материала нитей

Table 2

Characteristics/mechanical properties of yarn material

Параметр	Обозначение	Величина
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1 440
Модули упругости первого рода (модули упругости), МПа	$E_A$	$1,4 \cdot 10^5$
	$E_B, E_C$	$1,4 \cdot 10^4$
Модули упругости второго рода (модули сдвига), МПа	$G_{AB}, G_{BC}$	$1,4 \cdot 10^4$
	$G_{CA}$	40
Коэффициенты Пуассона	$\mu_{AB}, \mu_{BC}, \mu_{AC}$	0,001
Предел прочности на растяжение, ГПа	$\sigma_B$	3

Контакт между нитями задавали командой \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE, которая выполняет проверку контактного взаимодействия между поверхностями нитей основы и утка. Здесь узлам одной поверхности находятся виртуальные узлы на другой поверхности, и оценивается проникновение (с генерацией усилий отталкивания, пропорциональных контактной жесткости) или зазор.

Для ткани без обработки статический коэффициент трения был определен экспериментально (п. 2.3). Поверхностная обработка тканей в моделях учитывалась назначением величины статического коэффициента сухого трения (табл. 3) из условия наилучшего соответствия расчетной и экспериментальной кривых «нагрузка–перемещение» при вытяжке нити. Оказалось, что одного параметра (коэффициента сухого трения) достаточно для адекватного описания наблюдаемых эффектов различной поверхностной обработки (рис. 12).

В расчете использовали явную схему интегрирования и опцию mass scaling [41], позволяющую уменьшить время расчета задачи. Скорость вытягивания нити в модели была принята равной 0,1 м/с для ускорения расчета, при этом кинетическая энергия была пренебрежимо мала по сравнению с двумя основными формами диссипации энергии: внутрен-

ней энергии (internal energy) и энергии, затраченной на трение (sliding interface energy). На рис. 12 представлено изменение энергий от времени, полученное расчетным путем.

Таблица 3

Коэффициенты сухого трения

Table 3

Dry friction coefficients

Тип пропитки	Значения коэффициентов сухого трения
Нет	0,174
ПВА	0,261
ПВА-Т	0,261
Канифоль	0,261
Силиконовая смазка	0,127

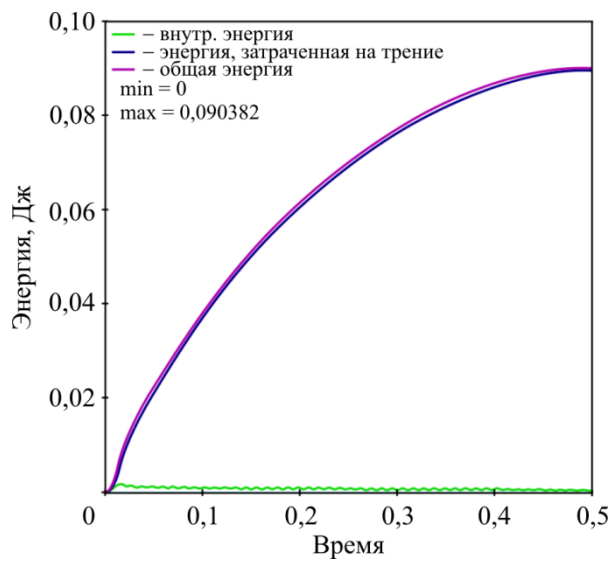


Рис. 12. Изменение энергетических компонентов от времени для исходной ткани

Fig. 12. Change of energy components vs. time for neat ballistic fabric

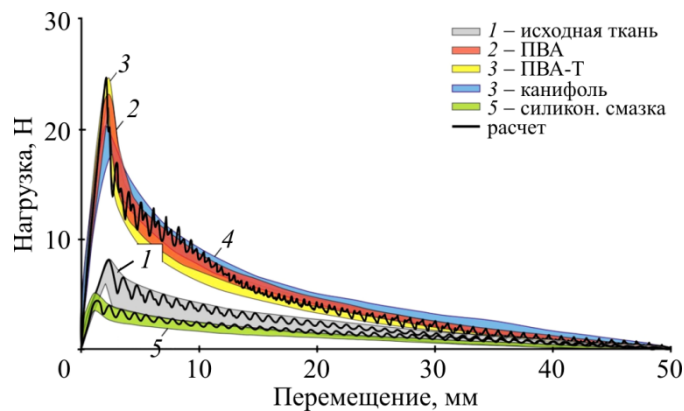


Рис. 13. Зависимости «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из исходной ткани

Fig. 13. Diagrams “Force-displacement” for pull-out test, the neat fabric

Расчеты были выполнены на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» [45]. На рис. 13 представлено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани с различного типа поверхностными обработками и без них. Расчетные кривые лежат в пределах разброса экспериментальных данных. Осцилляции нагрузки на расчетных и экспериментальных кривых совпадают и зависят лишь от геометрии переплетения ткани (шага искривления).

## **Заключение и выводы**

В работе проведено экспериментальное исследование сопротивления статическому вытягиванию нитей из арамидных тканей полотняного переплетения артикула P110 с различного типа поверхностными обработками. Эксперименты показали, что поверхностная обработка ткани суспензией ПВА или канифолью значительно повышает максимальное усилие и энергию фрикционных связей, затрачиваемую на вытягивание. Эта энергия, отнесенная к поверхностной плотности ткани (удельная энергия), для рассмотренных выше поверхностных обработок практически одинакова. Применение силиконовой смазки почти в полтора раза снижает максимальное усилие и энергию вытягивания нити из ткани по сравнению с соответствующими величинами необработанной ткани. Проведены также экспериментальные исследования по определению механических характеристик арамидных нитей ( $E = 1,4 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_B = 3 \cdot 10^3$  МПа) и коэффициента сухого трения для ткани без поверхностной обработки ( $\mu = 0,174$ ).

Разработана численно эффективная модель вытягивания нити из ткани, позволяющая прогнозировать зависимость нагрузки вытягивания от перемещения нити. Поверхностную обработку ткани в модели учитывали изменением лишь одного параметра – коэффициента сухого трения. Расчетные и экспериментальные данные по изменению силы вытягивания от перемещения хорошо согласуются между собой.

Разработанная малопараметрическая модель может быть в дальнейшем использована для прогнозирования поведения пакета баллистических арамидных тканей с различной поверхностной обработкой слоев при локальном ударе.

## **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01024 А. Авторы выражают признательность ЗАО «ФОРТ Технологии» (г. Москва) за предоставленные для экспериментов ткани.

## **Acknowledgments**

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-08-01024 A. The authors also acknowledge FORT Technology (Moscow) for providing fabrics used in experiments.

## **Библиографический список**

1. Lightweight ballistic composites / ed. A. Bhatnagar. – Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. – 429 p.
2. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.

3. Харченко Е.Ф., Ермоленко А.Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы / ОАО «ЦНИИСМ». – М., 2013. – 294 с.
4. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты: учебник. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.
5. Харченко Е.Ф. Закономерности и парадоксы разрушения текстильных бронематериалов при осколочном воздействии // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2008. – Вып. 1(148)–2(149). – С. 3–6.
6. Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar®49 fabric / D. Zhu, C. Soranakom, B. Mobasher, S.D. Rajan // Composites: Part A. – 2011. – Vol. 42. – P. 868–879. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.03.017
7. Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics / G. Nilakantan, R.L. Merrill, M. Keefe, J.W. Gillespie Jr., E.D. Wetzel // Composites: Part B. – 2015. – Vol. 68. – P. 215–229. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.08.033
8. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact / S. Das, S. Jagan, A. Shaw, A. Pal // Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 129–140. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.063
9. Пат. 2100748 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> F 41 Н 1/02, В 32 В 27/04. Композиционный пулезащитный материал / Сапожников С.Б., Понькин А.В., Шульженко С.И.; заявитель и патентообладатель С.Б. Сапожников, А.В. Понькин, С.И. Шульженко. – № 93042738/02; заявл. 26.08.93, опубл. 27.12.97. Бюл. № 36. – 6 с.
10. Долганина Н.Ю. Деформирование и разрушение слоистых тканевых пластин при локальном ударе: дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06. – Челябинск, 2010. – 128 с.
11. Пат. 2175035 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> D 03 D 15/00, F 41 Н 1/02. Ткань для баллистической защиты и баллистический защитный тканевой пакет на ее основе / Бова В.Г., Федоров В.А., Тихонов И.В., Башенко А.П., Слугин И.В., Ситуха В.Н., Лебедева Н.А., Львов В.В., Анилионис Г.П., Васильев Ю.Л., Карусевич А.С.; заявитель и патентообладатель НПП «Термостойкий текстиль». – № 99127977; заявл. 30.12.1999; опубл. 20.10.2001. Бюл. № 29. – 8 с.
12. Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems / M.R. Ahmad, W.Y.W. Ahmad, J. Salleh, A. Samsuri // Materials and Design. – 2008. – Vol. 29. – P. 1353–1358. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.06.007
13. Karahan M., Kus A., Eren R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics // International Journal of Impact Engineering. – 2008. – Vol. 35. – P. 499–510. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.04.003
14. Kang T.J., Lee S.H. Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite // Journal of Composite Materials. – 1994. – Vol. 28. – No. 16. – P. 1574–1587. DOI: 10.1177/002199839402801604
15. Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I – Effect of laminating sequence / J.L. Park, B. II Yoon, J.G. Paik, T.J. Kang // Textile Research Journal. – 2012. – Vol. 82. – No. 6. – P. 527–541. DOI: 10.1177/0040517511420753
16. Blunt trauma performance of fabric systems utilizing natural rubber coated high strength fabrics / M.R. Ahmad, W.Y.W. Ahmad, A. Samsuri, J. Salleh, M.H. Abidin // Proceeding of the International Conference on Advancement of Materials and Nanotechnology (ICAMN 2007, 29 May – 1 June 2007). – Langkawi, 2010. – Vol. 1217. – No. 1. – P. 328–334. DOI: 10.1063/1.3377838
17. Gawandi A., Thostenson E.T., Gillespie J.W. Jr. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric // Journal of Materials Science. – 2011. – Vol. 46. – No. 1. – P. 77–89. DOI: 10.1007/s10853-010-4819-3
18. Majumdar A., Butola B.S., Srivastava A. Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid // Materials and Design. – 2014. – Vol. 54. – P. 295–300. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.086

19. Моссаковский П.А., Колотников М.Е., Антонов Ф.К. Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканевого композита с нанокompозитной пропиткой // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – Т. 10, № 67. – С. 151–155.
20. Lee B.-W., Kim I.-J., Kim Ch.-G. The Influence of the Particle Size of Silica on the Ballistic Performance of Fabrics Impregnated with Silica Colloidal Suspension // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43. – No. 23. – P. 2679–2698. DOI: 10.1177/0021998309345292
21. Lee B.-W., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts // *Advanced Composite Materials*. – 2012. – Vol. 21. – No. 2. – P. 177–192. DOI: 10.1080/09243046.2012.690298
22. Hassan T.A., Rangari V.K., Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites // *Materials Science and Engineering A*. – 2010. – Vol. 527. – P. 2892–2899. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.018
23. Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics / J.B. Mayo Jr., E.D. Wetzel, M.V. Hosur, S. Jeelani // *International Journal of Impact Engineering* – 2009. – Vol. 36. – P. 1095–1105. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.03.006
24. Харченко Е.Ф., Заикин С.В. Материалы на основе арамидных волокон для защиты от холодного оружия // *Вопросы оборонной техники*. Сер. 15. – 2000. – № 1(122). – С. 28–29.
25. Соловьева Е.А., Курмашова И.А. Исследование механизма взаимодействия колющего оружия с защитными структурами на основе высокопрочных волокон // *Вопросы оборонной техники*. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2015. – Вып. 4(179). – С. 60–65.
26. Пат. 2206858 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 41 H 1/02, 5/04. Защитная одежда от колющего удара и пули / Фельс А., Беттгер К., Поллигкэйт В., Ной Ш., Клигспор К.; заявитель и патентообладатель «Тварон ПРОДАКТС ГМБХ». – № 2000122093/02; заявл. 18.01.1999; опубл. 20.06.2003, Бюл. № 17. – 13 с.
27. Баженов С.Л., Гончарук Г.П. Исследование трения нитей в арамидных тканях // *Высокомолекулярные соединения*. Сер. А. – 2012. – Т. 54, № 10. – С. 1532–1538.
28. A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain wave of aramid fibers / H. Lopez-Galvez, M. Rodriguez-Millan, N. Feito, H. Miguelez // *Mechanics Research Communications*. – 2016. – Vol. 74. – P. 52–56. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2016.04.004
29. Tapie E., Guo Y.B., Shim V.P.W. Yarn mobility in woven fabrics – a computational and experimental study // *International Journal of Solids and Structures*. – 2016. – Vol. 80. – P. 212–226. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.11.005
30. Finite element simulation of a yarn pullout test for plain woven fabrics / M. Valizadeh, S. Lomov, S.A.H. Ravandi, M. Salimi, S. Z. Rad // *Textile Research Journal*. – 2010. – Vol. 80. – No. 10. – P. 892–903. DOI: 10.1177/0040517509346436
31. Dong Z., Sun C.T. Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics // *Composites: Part A*. – 2009. – Vol. 40. – P. 1863–1869. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.019
32. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor // *International Journal of Impact Engineering*. – 2003. – Vol. 28. – P. 13–31. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00031-3
33. Tan V.B.C., Ching T.W. Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – Vol. 32. – No. 11. – P. 1737–1751. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.006
34. Barauska R., Abraitiene A. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA // *International Journal of Impact Engineering*. – 2007. – Vol. 34. – P. 1286–1305. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.002
35. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric / C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, F. Boussu // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2013. – Vol. 69. – P. 32–39. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.01.014

36. Sapozhnikov S.B., Forental M.V., Dolganina N.Yu. Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor // Proceeding of conference “Finite element modelling of textiles and textile composites” – St-Petersburg, 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
37. Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network / S. Gatouillat, A. Bareggi, E. Vidal-Sallé, P. Boisse // *Composites: Part A*. – 2013. – Vol. 54. – P. 135–144. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010
38. Игнатова А.В., Сапожников С.Б. Обработка поверхности арамидной ткани для управления поглощением энергии удара в слоистых композитах // *Композиты и наноструктуры*. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 231–240.
39. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: в 2 т. – М.: Наука, 1979. – Т. 1. – 272 с.
40. Nikonova E.A., Pakshver A.B. The friction properties of textile yarns // *Fibre Chemistry*. – 1973. – Vol. 4. – No. 6. – P. 657–660.
41. LS-DYNA R7.0 Keyword user's manual / LSTC, 2013. – URL: <http://www.lstc.com>
42. Nilakantan G., Nutt, S. Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 108. – P. 137–150. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.017
43. Finite element analysis of projectile size and shape effects on the probabilistic penetration response of high strength fabrics / G. Nilakantan, E.D. Wetzel, T. Bogetti, J.W. Gillespie // *Composite Structures*. – 2012. – Vol. 94. – No. 5. – P. 1846–1854. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.12.028
44. Effect of statistical yarn tensile strength on the probabilistic impact response of woven fabrics / G. Nilakantan, M. Keefe, E.D. Wetzel, T.A. Bogetti, J.W. Gillespie // *Composites Science and Technology*. – 2012. – Vol. 72. – No. 2. – P. 320–329. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.11.021
45. Костенецкий П.С., Сафонов А.Ю. Суперкомпьютерный комплекс ЮУрГУ // *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): сб. ст. 10-й Междунар. науч. конф. (28 марта – 1 апреля 2016 г.)*. – Архангельск, 2016. – С. 561–573.

## References

1. Bhatnagar A. *Lightweight ballistic composites*. Cambridge, Woodhead publishing limited, 2006, 429 p.
2. Grigoryan V.A., Kobilkin I.F., Marinin V.M., Chistiakov E.N., *Materialy i zashchitnye struktury dlia lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniia* [Materials and protection structures for local and individual armours]. Moscow, *izd-vo RadioSoft*, 2008, 406 p.
3. Kharchenko E.F., Ermolenko A.F. *Kompozitnye, tekstil'nye i kombinirovannye bronematerialy* [Composite, textile and combined armor materials]. Moscow, *Publ. of TsNIISM*, 2013, 294 p.
4. Kobilkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoi bronzashchity: uchebnik* [Materials and structure of lightweight body armour: textbook]. Moscow, *izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana*, 2014, 191 p.
5. Kharchenko E.F. *Zakonomernosti i paradoksy razrusheniia tekstil'nykh bronematerialov pri oskolochnom vozdeistvii* [Mechanisms and paradoxes of fabric armor materials failure under the impact of fragments] *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 15 – Defense Engineering Problems. Series 15*, 2008, no. 1(148)-2(149), pp. 3-6.
6. Zhu D., Soranakom C., Mobasher B., Rajan S.D. Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar® 49 fabric. *Composites: Part A*, 2011, vol. 42, pp. 868-879. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.03.017
7. Nilakantan G., Merrill R.L., Keefe M., Gillespie J.W. Jr., Wetzel E.D. Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics. *Composites: Part B*, 2015, vol. 68, pp. 215-229. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.08.033
8. Das S., Jagan S., Shaw A., Pal A. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 129-140. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.063
9. Sapozhnikov S.B., Pon'kin A.V., Shul'zhenko S.I. *Kompozitsionnyi pulezashchitnyi material* [Composite bulletproof material]. Patent RU 2100748 of 27.12.97, 6 p.

10. Dolganina N.Yu. Deformirovanie i razrushenie sloistykh tkanevykh plastin pri lokal'nom udare. PhD thesis [Deformation and fracture layered tissue plates under local impact. PhD thesis]. *Chelyabinsk*, 2010, 128 p.
11. Bova V.G., Fedorov V.A., Tikhonov I.V., Bashchenko A.P., Slugin I.V., Situkha V.N., Lebedeva N.A., L'vov V.V., Anilionis G.P., Vasil'ev Ju.L., Karusevich A.S. Tkan' dlia ballisticheskoi zashchity i ballisticheskii zashchitnyi tkanevoi paket na ee osnove [Ballistic protection cloth and pack based on ballistic protection cloth]. Patent RU 2175035 of 20.10.2001, 8 p.
12. Ahmad M.R., Ahmad W.Y.W., Salleh J., Samsuri A. Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems. *Materials and Design*, 2008, vol. 29, pp. 1353-1358. doi: 10.1016/j.matdes.2007.06.007
13. Karahan M., Kus A., Eren R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 499-510. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.04.003
14. Kang T.J., Lee S.H. Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite. *Journal of Composite Materials*, 1994, vol. 28, no. 16, pp. 1574-1587. DOI: 10.1177/002199839402801604
15. Park J.L., Yoon B. II, Paik J.G., Kang T.J. Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I – Effect of laminating sequence. *Textile Research Journal*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 527-541. DOI: 10.1177/0040517511420753
16. Ahmad M.R., Ahmad W.Y.W., Samsuri A., Salleh J., Abidin M.H. Blunt Trauma Performance of Fabric Systems Utilizing Natural Rubber Coated High Strength Fabrics. Proceeding of the *International Conference on Advancement of Materials and Nanotechnology* (ICAMN 2007, 29 May-1 June 2007). Langkawi, 2010, Vol. 1217, pp. 328-334
17. Gawandi A., Thostenson E.T., Gillespie J.W. Jr. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric. *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46, pp. 77-89. DOI: 10.1007/s10853-010-4819-3
18. Majumdar A., Butola B.S., Srivastava A. Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid. *Materials and Design*, 2014, vol.54, pp. 295-300. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.086
19. Mossakovsky P.A., Kolotnikov M.E., Antonov F.K. Issledovanie protsessa probivaniia mnogoslainoi pregrady iz tkanevogo kompozita s nanokompozitnoi propitkoi [Investigation of punching multilayer wo-ven composite barrier treated with nanocomposite fluid]. *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia – Aerospace technic and technology*, 2009, no. 10 (67), pp. 151-155.
20. Lee B.-W., Kim I.-J., Kim Ch.-G. The influence of the particle size of silica on the ballistic performance of fabrics impregnated with silica colloidal suspension. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, No. 23, pp. 2679-2698. DOI: 10.1177/0021998309345292
21. Lee B.-W., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts. *Advanced Composite Materials*, 2012, vol. 21, no. 2, pp. 177-192. DOI: 10.1080/09243046.2012.690298
22. Hassan T.A., Rangari V.K., Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites. *Materials Science and Engineering A*, 2010, vol. 527, pp. 2892-2899. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.018
23. Mayo J.B. Jr., Wetzel E.D., Hosur M.V., Jeelani S. Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, pp. 1095-1105. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.03.006
24. Kharchenko E.F., Zaikin S.V. Materialy na osnove aramidnykh volokon dlia zashchity ot kholodnogo oruzhiia [Materials based on aramid fibers for protection from cold weapons]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriiia 15 – Defense Engineering Problems. Series 15*, 2000, no. 1(122), pp. 28-29.
25. Soloveva E. A., Kurmashova I.A. Issledovanie mekhanizma vzaimodeistviia koliushchego oruzhiia s zashchitnymi strukturami na osnove vysokoprochnykh volokon [Investigation of the mechanism of interaction of the piercing weapon with protective structures based on high-strength fibers]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriiia 15 – Defense Engineering Problems. Series 15*, 2015, no. 4(179), pp. 60-65.
26. Fel's A., Bettger K., Pollikgajt V., Noj S., Klingspor K. Zashchitnaia odezhda ot koliushchego udara i puli [Protective clothing against stabbing weapon and bullet]. Patent RU 2206858 of 20.06.2003, 13 p.
27. Bazhenov S.L., Goncharuk G.P. A Study of Yarn Friction in Aramid Fabrics / S. L. Bazhenov. *Polymer Science, Ser. A*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 803-808. DOI: 10.1134/S0965545X12090015
28. Lopez-Galvez H., Rodriguez-Millan M., Feito N., Miguelez H. A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain wave of aramid fibers. *Mechanics Research Communications*, 2016, vol. 74, pp. 52-56. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2016.04.004



29. Tapie E., Guo Y.B., Shim V.P.W. Yarn mobility in woven fabrics – a computational and experimental study. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, vol. 80, pp. 212-226. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.11.005
30. Valizadeh M., Lomov S., Ravandi S.A.H., Salimi M., Rad S. Z. Finite Element Simulation of a Yarn Pullout Test for Plain Woven fabrics. *Textile Research Journal*, 2010, vol. 80, no. 10, pp. 892-903. DOI: 10.1177/0040517509346436
31. Dong Z., Sun C.T. Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics. *Composites: Part A*, 2009, vol. 40, pp. 1863-1869. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.019
32. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 13-31. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00031-3
33. Tan, V.B.C., Ching T.W. Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, no. 11, pp. 1737-1751. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.006
34. Barauskasa R., Abraitiene A. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, pp. 1286-1305. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.002
35. Ha-Minh C., Imad A., Kanit T., Boussu F. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 69, pp. 32-39. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010
36. Sapozhnikov S.B., Forental M.V., Dolganina N.Yu. Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor. Proceeding of conference “*Finite element modeling of textiles and textile composites*”. St-Petersburg, 2007. – 1 CD-ROM.
37. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Sallé E., Boisse P. Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites: Part A*, 2013, vol. 54, pp.135-144. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010
38. Ignatova A.V., Sapozhnikov S.B. Obrabotka poverkhnosti aramidnoi tkani dlia upravleniia pogloshcheniem energii udara v sloistykh kompozitakh [Surface treatment of aramid fabrics to the control impact energy absorption in layered composites]. *Kompozity i nanostuktury – Composites and nanostructures*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 231-240.
39. Butenin N.V., Luntz Y.L., Merkin D.R. Kurs teoreticheskoi mekhaniki [A course of Theoretical Mechanics], 2 vols. *Moscow, Nauka Publ.*, 1979.
40. Nikonova E.A., Pakshver A.B. The friction properties of textile yarns. *Fibre Chemistry*, 1973, vol. 4, no. 6, pp. 657-660.
41. LS-DYNA R7.0 Keyword user's manual. LSTC, 2013. <http://www.lstc.com>
42. Nilakantan G., Nutt S. Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor. *Composite Structures*, 2014, vol. 108, pp. 137-150. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.017
43. Nilakantan G., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W. Finite element analysis of projectile size and shape effects on the probabilistic penetration response of high strength fabrics. *Composite Structures*, 2012, vol. 94, no. 5, pp. 1846-1854. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.12.028
44. Nilakantan G., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W. Effect of statistical yarn tensile strength on the probabilistic impact response of woven fabrics. *Composites Science and Technology*, 2012, vol. 72, no. 2, pp. 320-329. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.11.021
45. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources. *Arkhangelsk, Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. 2016, vol. 1576, pp. 561-573.